

## ПУТИ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ IGBT/MOSFET ТРАНЗИСТОРОВ В СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

*Лопатко М.О.*

Научный руководитель – МИХАЛЬЦЕВИЧ Г.А.

Широкое использование транзисторов IGBT началось с 80-х годов и уже претерпело четыре стадии своего развития.

1-ое поколение IGBT (1985 г.) имело предельные коммутируемые напряжения 1000 В, токи 200 А в модульном и 25 А в дискретном исполнении, прямое падение напряжения 3,0–3,5 В, частота переключения до 20 кГц (время включения/выключения 0,5 мкс).

4-ое поколение IGBT (1998 г.): предельные коммутируемые напряжения 4500 В, токи 1800 А в модульном исполнении, прямое падение напряжения 1,0–1,5 В, частота переключения до 50 кГц (время включения / выключения 200 нс).

Появление на рынке силовых полупроводников транзисторов IGBT и быстрое их распространение объясняется врожденными недостатками, присущими транзисторам MOSFET. В первую очередь, это большое сопротивление открытого канала высоковольтных полевых транзисторов.

Как известно [1], сопротивление в открытом состоянии  $R_{DS(on)}$  растет примерно пропорционально квадрату пробивного напряжения. Иногда это утверждение описывается соотношением

$$R_{DS(on)} = R_0 V^a,$$

где  $a = 1,6 - 2,5$  по данным разных производителей;

$R_0$  – минимальное сопротивление в открытом состоянии.

Выпрямленное напряжение промышленной сети составляет примерно 310 В для сети 220 В и 540 В для сети 380 В. Для обеспечения безопасной работы современных силовых ключей рекомендуется использовать транзисторы с напряжением, на 200 В превышающим напряжение питания (такие рекомендации содержатся в документах фирмы International Rectifier и некоторых других). Объясняется это в частности тем, что при скоростях изменения напряжений и токов, которые обеспечивают MOSFET и IGBT транзисторы (время их коммутации может составлять десятки наносекунд), выбросы напряжения за счет паразитных индуктивностей подводящих проводов и выводов конденсаторов могут привести к отказу элемента.

В последние годы для защиты от переходных перенапряжений появилось много специальных элементов с отличными характеристиками (например, диоды TRANSIL фирмы ST-Microelectronics), да и сами элементы способны выдерживать лавинный пробой со значительной энергетикой. Однако требование осталось, и разработчики хотят иметь транзисторы на напряжение не менее 500 В для 220 В сетей и 800 В для 380 В питающих сетей.

Статические потери (или потери проводимости) MOSFET пропорциональны квадрату тока  $I_d$  и сопротивлению открытого канала  $R_{DS(on)}$ :

$$P_D = I_d^2 R_{DS(on)}.$$

Транзисторы с меньшим сопротивлением канала имеют больший размер кристалла, больший заряд затвора и, соответственно, все связанные с этим проблемы.

У IGBT транзисторов потери проводимости  $P_D$  зависят от тока коллектора  $I_C$  практически линейно

$$P_D = I_C U_{CE}.$$

Напряжение  $U_{CE}$  открытого транзистора тоже, в свою очередь, зависит от тока. Соответствующие графики, также как и значение  $R_{DS(on)}$ , обязательно приводятся в технических данных на транзисторы, и расчет статических потерь обычно не представляет трудности. Некоторые проблемы могут быть связаны с тем, что во время периода проводимости ток может изменяться. Характер этого изменения зависит от конфигурации схемы.

Кроме того, падение напряжения на открытом транзисторе зависит от температуры, причем зависимость эта – положительная для MOSFET и отрицательная для IGBT транзисторов. Общее представление о соотношении предельного рабочего напряжения и напряжения открытого транзистора дает таблица 1, в которой падение напряжения измерено при одной и той же плотности тока и температуре кристалла.

Таблица 1

|                             |        |     |      |      |      |
|-----------------------------|--------|-----|------|------|------|
| Рабочее напряжение, В       | IGBT   | 100 | 300  | 600  | 1200 |
|                             | MOSFET | 100 | 250  | 500  | 1000 |
| Падение напряжения, В       | IGBT   | 1,5 | 2,1  | 2,4  | 3,1  |
| При 1,7 А, мм, $t = 100$ °С | MOSFET | 2,0 | 11,2 | 26,7 | 100  |

Транзисторы IGBT тоже имеют врожденный дефект, и он носит название «хвост» (tail). Этот эффект объясняется наличием остаточного тока коллектора после выключения транзистора из-за конечного времени жизни неосновных носителей в области базы PNP транзистора.

Поскольку база недоступна, ускорить время выключения схемными методами нельзя. Для сокращения «хвоста» существуют технологические приемы и у современных транзисторов он уже гораздо меньше, чем у IGBT первых поколений. Борьба за высокие динамические характеристики, сокращение потерь переключения приводит к росту потерь проводимости, и достигнуть оптимальных результатов тут пока не удаётся.

В свою очередь снижение статических потерь, а это достигается, в частности, за счет увеличения коэффициента передачи PNP транзистора и снижения напряжения насыщения, приводит к росту потерь переключения. Поэтому все ведущие производители IGBT выпускают транзисторы с разным быстродействием для применения на разных частотах.

К счастью для разработчиков значение энергии выключения  $E_{off}$ , приводимое в справочных данных лучших производителей, учитывает наличие «хвоста», что упрощает расчет потерь. С изготовителями транзисторов, которые не дают таких данных, лучше не связываться.

Как может показаться из сказанного, MOSFET транзисторы имеют сплошные преимущества в области потерь переключения. Однако это далеко не так. Портит картину тельный или внутренний (но не встроенный!) диод (body diode) полевого транзистора. Характеристики его обратного восстановления (заряд  $Q_{rr}$ , время  $t_{rr}$ ) оказываются гораздо хуже, чем у специальных диодов с малым временем обратного восстановления, которые применяются в качестве антипараллельных диодов в IGBT. Для решения этой проблемы рекомендуется исключать диод включением двух быстрых диодов последовательно – параллельно.

Чтобы уменьшить потери при переключении корпорация IXYS разработала три уникальных микросхемы MOSFET/IGBT-драйвера: 30-амперный драйвер, 45-мегагерцовый драйвер и 6-амперный полумостовой драйвер. Эти микросхемы обеспечивают требуемое изменение тока за единицу времени  $\frac{di}{dt}$ , минимальные потери при переключении, и в проводящем состоянии, обладают повышенным иммунитетом к изменению напряжения за единицу времени  $\frac{du}{dt}$ , защитой от перенапряжения (OV, over-voltage) и пониженного напряжения (UV, under-voltage), перегрузок (OL, overload) и недонасыщения (DESAT, de-saturation), а также мягким выключением выхода с использованием новой функции аппаратного управления – ENABLE.

### Литература

1. Колпаков, А.И. IGBT или MOSFET? Практика выбора // Электроника. – 2003. – № 10. – С. 6–9.

УДК 621.316.176

## ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*Воробей А.М.*

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент СОНЧИК Л.И.

Индукционный нагрев находит широкое применение в приборо- и машиностроении для плавки металлов, нагрева заготовок перед термообработкой и пластической деформацией, сварки металлов, нагрева диэлектриков и полупроводниковых материалов.

Индукционный нагрев по сравнению с другими методами обладает рядом преимуществ: меньший расход электроэнергии при ее передаче в нагреваемое тело бесконтактным путем, простота регулирования температуры нагрева, высокая экологическая чистота технологического процесса.

Индукционные установки делятся на: плавильные индукционные печи (ИП) и нагревательные установки, однофазные и трехфазные, промышленной частоты и повышенной частоты.

Индукционные плавильные печи делятся на канальные и тигельные. Канальные печи содержат замкнутый магнитопровод, на котором находится индуктор и канал с жидким металлом, окружающий индуктор. Тигельные печи представляют собой огнеупорный тигель с металлом, помещенный в полость индуктора.

Канальные ИП являются установками промышленной частоты. Для питания тигельных ИП предпочтительными являются источники повышенной частоты вследствие эквивалентности их схемы замещения схеме воздушного трансформатора, у которого роль первичной обмотки и нагрузки выполняет шихта и расплавленный металл в керамическом тигле [1].

Индукционные печи промышленной частоты могут подключаться к цеховым сетям непосредственно и через регулировочные трансформаторы. При этом мощные однофазные установки требуют подключения через симметрирующие устройства [2].

При питании ИП повышенной частоты возможно использование индивидуальных преобразователей.

Исходя из вышесказанного следует, что источники питания ИП должны выполнять две функции: преобразование частоты тока и симметрирование нагрузки.